人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征

王 博[1]，段玉玺，王伟峰，李晓晶，刘 源，刘宗奇

(内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要：以库布齐沙漠东缘人工固沙区不同植被演替阶段(演替初期、中期、后期、成熟期)的沙地为研究对象，对 2017、2018 年生长季沙地迎风坡顶部、中部和底部 0～180 cm 土壤分层测定体积含水量，阐明荒漠土壤水分时空分异特征及其对环境因子的响应。结果表明：因降水量的差异导致研究区土壤含水量存在年际变化，2018 年(8.8%)>2017 年(4.8%)；受降水事件和植物生长的影响，4 种样地土壤含水量均具有生长季初期缓慢下降、生长旺盛期降水补给后快速增大、生长季末期稳定积累的阶段特征；不同植被演替阶段土壤含水量整体表现为演替初期(7.3%)>成熟期(7.2%)>后期(6.7%)>中期(5.9%)；4 种样地均为迎风坡中部土壤含水量最低，坡顶和坡底含水量在不同演替阶段各有高低；4 种样地土壤含水量均呈现随土层加深含水量先降低后增大的动态趋势，表层 0～20 cm 土层含水量显著高于其他各层，深层土壤存在水分变化拐点，是含水量最低的干沙层，在不同演替阶段或降水量下干沙层出现的深度会发生变化。在生长季末期，通过一季的消耗与补给，研究区内土壤水分储量呈正向平衡，可以满足人工固沙植被正常生长和演替所需水量。

关键词：人工固沙区；土壤含水量；植被演替；时空变化；库布齐沙漠

Spatial and temporal variability of soil water content during vegetation succession in sand-binding area

Wang Bo, Duan Yu-xi, Wang Wei-feng, Li Xiao-jing, Liu Zong-qi, Liu Yuan

(*Inner Mongolia Forestry Research Institute*, *Hohhot* 010010, *China*)

Abstract: Experiments were carried out in the eastern Hobq Desert, China, and took the sandy land at different stages of vegetation succession (primary stage, middle stage, later stage and maturation stage of succession) in the sand-binding area as the object. Layered measuring the soil volumetric water content of 0~180 cm at the top, middle and bottom of the windward slope of sandy land during the growing season of 2017 and 2018. The aim of this study was to investigate the spatio-temporal dynamic characteristics of soil water content, reveal the response of desert soil water content to environmental factors. The results showed that the annual variation of average soil water content in the study area was caused by the difference of precipitation, 2018 (8.8%) > 2017 (4.8%); (2) Affected by precipitation and plant growth, soil water content in the four sample plots all showed obvious seasonal variation, slowly decline in the early growing season, rapidly increase after replenishment by precipitation in the vigorous growing season, and stable accumulation in the end of growing season. Soil water content at different vegetation succession stages was generally showed as primary stage (7.3%) > maturation stage (7.2%) > later stage (6.7%) > middle stage (5.9%). The soil water content in the middle of the windward slope was the lowest in all the four sample plots, and the soil water content of the top and bottom varied in different succession stages. The soil water content of the four sample plots all showed obvious vertical changes, decreased first and then increased with the deepening of soil layer. The water content of surface 0~20 cm layer was significantly higher than that of other layers. There was an inflection point of water content in deep soil in each sample plot, and was the dry sand layer which had the lowest water content, the depth of dry sand layer would change at different succession stages or precipitation conditions. In the end of growing season, the precipitation supply and vegetation consumption of soil

---

收稿日期: 2019-10-29; 改回日期:2019-12-27

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404204); 林业科技创新平台项目(2019132021); 内蒙古自然科学基金项目(2017MS0368); 内蒙古自然科学基金项目(2019MS03037)

作者简介: 王博(1989—),博士,助理研究员,主要从事林业碳汇和荒漠化防治研究. E-mail: wbbrave@163.com

通讯作者: 段玉玺. E-mail: nmg.dyx@163.com

water in the study area could reach a positive balance, and the soil water storage was able to sustain the normal growth of artificial vegetation in sand-binding area.

Key words: ; sand-binding area; soil water content; vegetation succession; spatio-temporal variation; Hobq desert

土壤水分是陆地生态系统水循环的重要组成部分，是陆生植物生长发育的基础要素[1]。尤其在荒漠生态系统中，土壤水分匮乏已成为生态恢复和植被建设的限制条件，水量平衡始终是人为干预活动的核心问题，并决定着生态系统的可持续性和植物群落的稳定性[2-3]。我国对于干旱半干旱区的沙化土地，以及大沙漠边缘和绿洲延伸区，已开展了广泛的荒漠化治理工作。大量实践证明，人工建植促进沙地固定，植被恢复，改善区域微生境，可形成群落自然演替的稳定生态系统[4-5]。在这一过程中，通过植被—土壤系统的生态水文循环和互馈作用，形成了土壤水分的明显空间异质性。而降水等气候因素的时间差异，产生了土壤水分较大的年际和季节异质性[6-8]。目前，干旱半干旱区土壤水分时空分异特征的研究已较多，如古尔班通古特沙漠南缘固定沙地土壤水分特征[9]，高寒灌木固沙区土壤水分条件对植物生长的影响[10]，腾格里沙漠固沙区干旱和丰水年土壤水分的动态差异[11]，半干旱区荒漠草原土壤水分变化对降雨量的响应[12]，毛乌素沙地土壤水分的时空变异系数[13]。

库布齐沙漠是我国第七大沙漠，其东缘是荒漠向草地、农田过渡的脆弱生态区，地形复杂多变，人为活动频繁，斑块破碎严重。目前，针对该区土壤水分变化已开展了一些研究，如顾梦鹤等[14]分析了不同防护林土壤水分差异。付聪明等[15]对防风固沙林土壤水分有效性进行了评价。然而，缺乏植被演替过程中土壤水分的时空动态研究，尤其是在长时间尺度上的连续监测，以及环境因子变化对土壤水分的影响，都是亟待解决的科学问题。本研究以空间代替时间，分析不同植被演替阶段荒漠土壤含水量的动态特征及其影响因素，以期揭示(1)人工建植促进植被恢复对荒漠土壤水分条件的影响；(2)荒漠土壤含水量对降水量、季节变化、坡位、土层深度等因子的响应；(3)区域土壤水分存量与固沙植被生长的供需关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗境内，属库布齐东段典型沙漠地貌类型。研究区为温带大陆性气候，具有明显的水热同期特征，春冬季节干旱多风，夏秋季节炎热且降水集中。年均气温 6.1～7.2 ℃，年均降水量 270.4 mm，年均蒸发量 2560.6 mm，年均风速 3.3 $m\cdot s^{-1}$。研究区内土壤以风沙土为主，主要植物种为沙柳(*Salix cheilophila*)、柠条(*Caragana intermedia*)、杨柴(*Hedysarum laeve*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

依据建植年代和植被演替进程划分样地类型，分别为：(1)演替初期，2015 年于流动沙地行带式扦插沙柳枝条，行间距 2 m，至测试年沙柳形态指标为：株高(68±11) cm，冠幅(45±7) cm，地表生长少量一年生草本植物；(2) 演替中期，2010 年于流动沙地网格状扦插沙柳枝条，网格规格 1.5 m×1.5 m，至测试年沙柳形态指标为：株高(135±17) cm，冠幅(79±13) cm，地表有杨柴群落出现，并生长少量一年生草本植物；(3)演替后期，2000 年于流动沙地行带式扦插沙柳枝条造林，行间距 2 m，经 2 次平茬后形成稳定的沙柳群落，至测试年沙柳形态指标为：株高(203±15) cm，冠幅(188±14) cm，自然生长柠条及大量一年生草本植物，地表已有地衣结皮发育；(4)成熟期，1995 年行带式扦插沙柳枝条造林，经自然稀疏形成冠幅较大的团簇状“沙柳岛”，岛间空地生长大量油蒿及一年生草本植物，植被盖度较大，凋落物

层较厚，地表已形成连片苔藓结皮，至测试年沙柳形态指标为：株高(238±24) cm，冠幅(252±33) cm。样地基本情况见表 1。

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic situation of the sample plots

演替阶段	植被恢复年限	地理位置	海拔/m	植被盖度/%	优势种构成	土壤容重/(g·cm⁻³)	土壤孔隙度/%	土壤饱和含水量/%
演替初期	3a	110°46′ 32.118″E, 40°04′ 47.854″N	1168	17.33±0.24	沙柳+沙竹+沙蓬(*Salix psammophila* + *Psammochloa villosa* + *Agriophyllum squarrosum*)	1.62±0.11	38.86±0.31	23.99±1.33
演替中期	8a	110°47′ 29.805″E, 40°04′ 34.179″N	1115	38.63±2.74	沙柳+杨柴(*Salix psammophila*+*Hedysarum leave*)	1.55±0.08	41.51±0.87	26.78±0.76
演替后期	18a	110°46′ 56.978″E, 40°04′ 40.868″N	1147	55.32±4.33	沙柳+柠条(*Salix psammophila*+*Caragana intermedia*)	1.43±0.12	46.03±0.15	32.19±0.53
成熟期	24a	110°46′ 28.344″E, 40°04′ 45.998″N	1159	65.76±8.12	沙柳+油蒿(*Salix psammophila*+*Artemisia ordosica*)	1.42±0.07	46.42±2.84	32.69±3.02

1.2.2 指标测定

研究区内气象资料由小型自动气象站(HOBO, USA)记录。

土壤体积含水量由土壤水分观测系统(TRIME-PICO, Germany)监测，监测时间为 2017 年 5 月—10 月，2018 年 5 月—10 月。为验证 TDR 水分传感器的测量精度，采用烘干法实测土壤含水量数据与 TDR 法数据进行对比分析。于 5 月初在不同样地坡顶位实测 40 组水分数据，结果表明，烘干法与 TDR 法获取的土壤含水量数据存在极显著线性相关关系($P < 0.01$)，相关系数 R^2 为 0.9115(图 1)，并通过差异性检验表明两种方法所测数据无显著差异。因此，可以判定 TRIME-PICO 水分观测系统在本研究中所得到的数据满足精度要求。

每个样地选择迎风坡布设土壤含水量监测样点，分别在迎风坡顶部、中部和底部各埋设 3 根长 2 m 的 TDR 测管，共 36 个监测点。土壤含水量监测深度为 0～180 cm，土层划分为 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm、60～80 cm、80～100 cm、100～120 cm、120～140 cm、140～160 cm、160～180 cm 共计 9 层。每月上、下旬各监测 1 次，如遇降雨则需等待 2～3 d 水分稳定后进行监测。

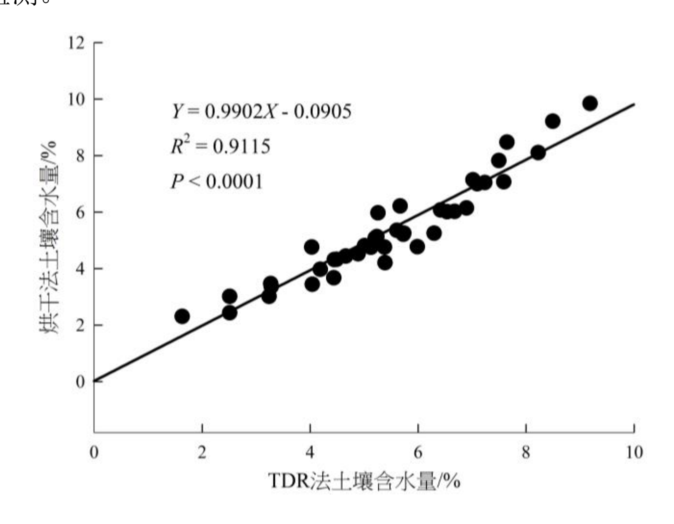


图 1　TDR 法土壤含水量校正曲线

Fig.1　Soil water content correction curve acquired with TDR method

1.3 数据处理

土壤储水量是指单位面积和一定深度土层内储存水分的数量，计算公式如下：

$$S_w = \sum_{i}^{n} W_i \times h_i \times 0.1$$

式中：S_w 为一定深度土层土壤储水量(mm)；W_i 为第 i 层土壤体积含水量(%)；h_i 为第 i 层土壤厚度(cm)；n 为土壤水分监测层数。

试验数据处理及作图采用 Excel 及 SigmaPlot 14.0 软件进行，并采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。选取最小显著极差法(LSD)进行不同样地间、不同坡位间、不同土层深度间土壤含水量的差异显著性检验(α=0.05)，采用双因素方差分析检验环境因子对土壤含水量的影响程度。

2　结果与分析

2.1　环境因子变化特征

研究区 2017 年生长季共发生降雨事件 35 次(图 2)，累积降水量为 233.8 mm，2018 年生长季共降雨 42 次，累积降水量为 329.1 mm，与多年平均降水量(270.4 mm)相比，前者为相对干旱年份，后者为相对湿润年份。2017 年单次最大降水量 21.7 mm，最小降水量 0.2 mm，大于 15 mm 的降雨共 6 次，占降水量的 48.1%，小于 5 mm 的降雨共 18 次，占降水量的 13.9%。2018 年单次最大降水量 35.8 mm，最小降水量 0.3 mm，大于 15 mm 的降雨共 9 次，占降水量的 64.3%，小于 5 mm 的降雨共 24 次，占降水量的 11.9%。研究区空气温、湿度年际变化较小，2017 年温度稍高，平均为 19.1℃，空气湿度为 57.3%，2018 年温度稍低，平均为 18.0℃，空气湿度为 57.9%。

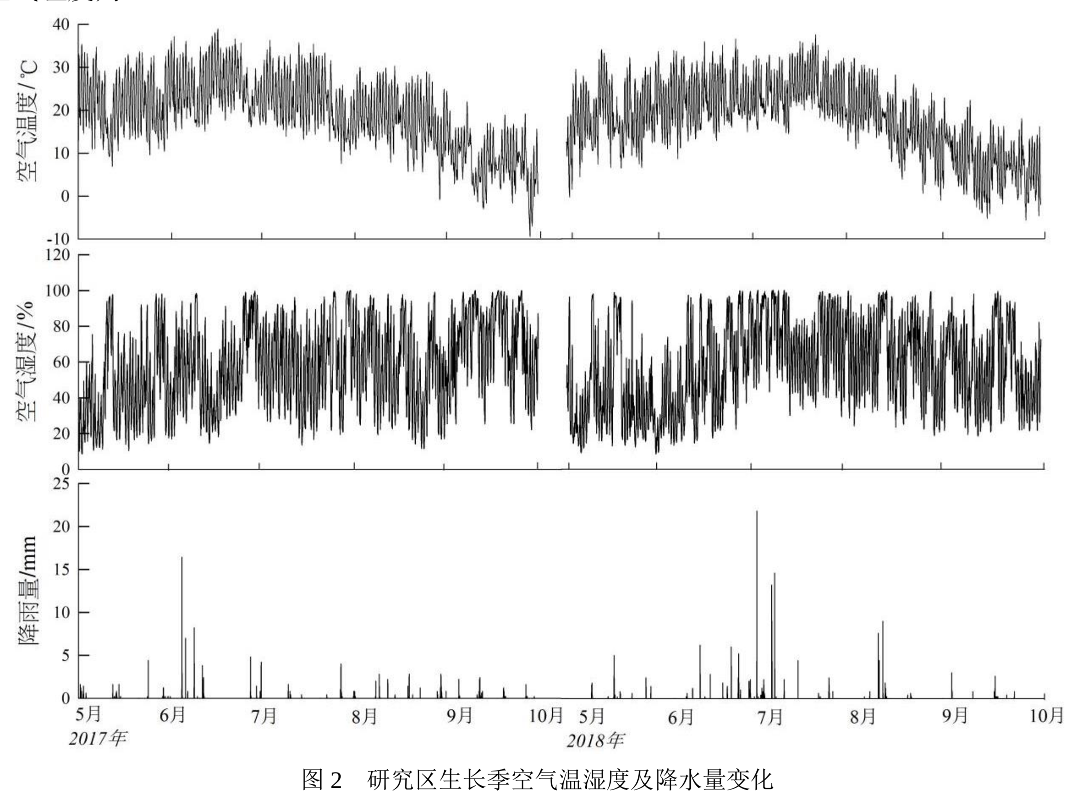


图 2　研究区生长季空气温湿度及降水量变化

Fig.2　The variation of air temperature, humidity and precipitation of growing season in the study area

2.2 土壤含水量时空变化特征

2.2.1 土壤含水量季节动态

2017 年植被演替的不同阶段荒漠土壤含水量具有差异化的季节变化趋势(表 2)。演替初期和后期土壤含水量分别在 5、7、10 月达到峰值，6、8、9 月为低谷；演替中期土壤含水量无明显季节波动，10 月为其峰值；成熟期土壤含水量呈下凹单峰曲线，5 月和 10 月含水量较高，6 月为其谷值。2018 年植被演替的不同阶段荒漠土壤含水量峰值均出现在 7 月，在 6 月含水量处于较低水平，其余月份表现出相对稳定的状态。由于天然降水是研究区荒漠土壤水分的唯一补给来源，因此，土壤含水量的变化必然受到降水事件的直接影响。含水量峰值的出现总是紧随集中降雨之后，而在降雨间隙，由于植物的生长耗水及土壤表面蒸发，土壤含水量会出现下降回落的现象。总体来说，土壤水分具有 3 个明显变化过程，即生长季初期缓慢下降阶段，生长旺盛期降水补给后的快速增长阶段，以及生长季末期的稳定积累阶段。降水量不同导致土壤含水量年际差异，2017 年生长季降水量相比 2018 年减少 28.9%，土壤平均含水量则显著降低 45.8%。

表 2　2017 年和 2018 年荒漠土壤含水量季节变化

Table 2　The seasonal variation of desert soil water content in 2017, 2018

演替阶段	指标	5 月		6 月		7 月		8 月		9 月		10 月	
		2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年
演替初期	平均值/%	5.60b	8.63C	4.72c	6.06D	5.92b	12.63A	4.84c	8.27C	4.92c	9.61B	6.33a	9.65B
	变异系数	0.11	0.17	0.19	0.24	0.35	0.10	0.14	0.06	0.17	0.06	0.16	0.08
演替中期	平均值/%	3.84b	5.34D	3.96ab	3.60E	3.82b	11.87A	3.67bc	8.17C	3.58c	9.62B	4.06a	9.71B
	变异系数	0.14	0.19	0.04	0.13	0.10	0.06	0.02	0.08	0.12	0.06	0.07	0.05
演替后期	平均值/%	5.07b	6.57D	3.71d	4.88E	5.52a	11.20A	4.59c	8.73C	4.80bc	9.50B	5.72a	9.56B
	变异系数	0.05	0.13	0.01	0.07	0.03	0.04	0.19	0.07	0.16	0.12	0.13	0.02
成熟期	平均值/%	5.85a	6.81E	4.18d	8.06D	4.39c	12.07A	4.60bc	9.05C	4.80b	10.30B	5.71a	10.08B
	变异系数	0.17	0.14	0.07	0.04	0.16	0.02	0.16	0.05	0.11	0.04	0.08	0.07

注：同行小写字母表示 2017 年同一样地不同月份间土壤含水量差异显著(P < 0.05)，同行大写字母表示 2018 年同一样地不同月份间土壤含水量差异显著(P < 0.05)。

2.2.2 土壤水分空间变化特征

在相同区域气候条件下，荒漠土壤含水量在水平空间上差异较为显著(P<0.05)，表现为随建植年代增加和植被演替，土壤含水量呈现先减小后增加的变化趋势(图 3)。从演替初期开始至演替中期为土壤干化过程，含水量平均下降 20.5%；到建植 18 a，植被演替后期土壤含水量又逐渐恢复，至成熟期土壤水分条件已趋于平衡。

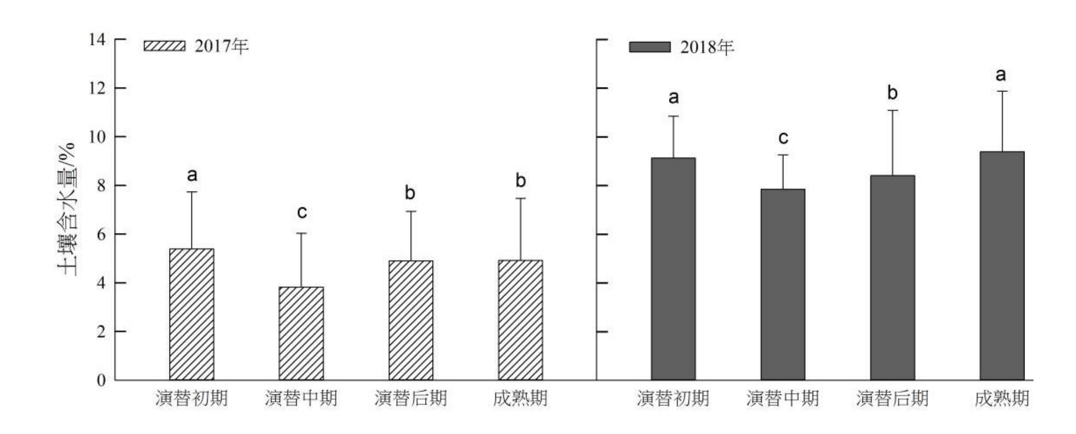


图 3　不同演替阶段荒漠土壤含水量变化

Fig.3　The variation of desert soil water content in different stages of vegetation succession

迎风坡坡位变化会明显改变土壤含水量的分配(表 3)。演替初期、中期和后期 2 个年份土壤含水量总体表现为：顶部>底部>中部，而成熟期土壤含水量则表现为：底部>顶部>中部。在不同植被演替阶段中，土壤含水量均以迎风坡中部最低，分别低于顶部和底部 9.8%和 7.9%。

表 3　不同坡位荒漠土壤含水量变化

Table 3　The variation of desert soil water content at different slope positions

演替阶段	指标	迎风坡顶部		迎风坡中部		迎风坡底部	
		2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年
演替初期	平均值/%	6.31a	9.28B	4.60c	8.53C	5.26b	9.60A
	变异系数	0.41	0.28	0.44	0.27	0.46	0.33
演替中期	平均值/%	3.79b	8.64A	3.94a	7.37C	3.73b	8.14B
	变异系数	0.63	0.38	0.50	0.45	0.61	0.45
演替后期	平均值/%	5.26a	8.57a	4.40c	8.20b	5.05b	8.45a
	变异系数	0.37	0.27	0.51	0.35	0.38	0.34
成熟期	平均值/%	4.99b	9.40B	4.52c	9.18C	5.25a	9.60A
	变异系数	0.45	0.30	0.64	0.26	0.48	0.24

注：同行小写字母表示 2017 年同一样地不同坡位间土壤含水量差异显著(P<0.05)，同行大写字母表示 2018 年同一样地不同坡位间土壤含水量差异显著(P<0.05)。

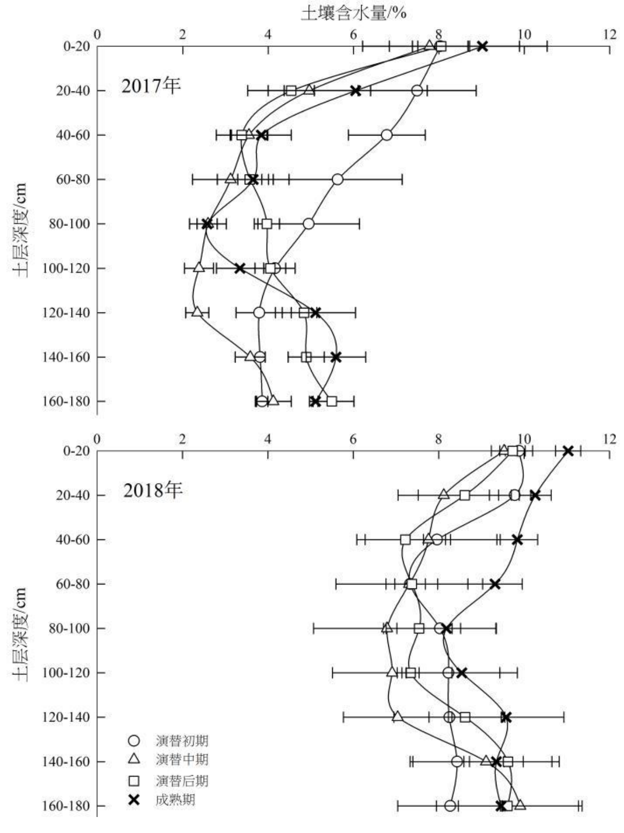


图 4　不同土层深度荒漠土壤含水量变化

Fig.4　The variation of desert soil water content with an increasing soil depths

荒漠土壤含水量垂直变化明显，表现出随土层加深先降低后增大的动态趋势(图 4)。0～20 cm 土层 2 个年份平均含水量显著高于其他各层，且具有随植被演替而增大的规律，表现为：成熟期(10.0%)>后期(8.9%)>中期(8.7%)>初期(8.6%)。各样地土壤含水量随土层加深的变化均存在明显拐点，即剖面层含水量最低的是干沙层。拐点出现的深度会因降水量对土壤整体水分状况的改变而不同。演替初期在干旱年份(2017 年)拐点为 120～140 cm 土层，相比表层含水量下降 52.8%，而在湿润年份(2018 年)拐点上升到 60～80 cm 土层，相比表层下降 25.1%。演替中期在干旱年份拐点为 120～140 cm 土层，相比表层含水量下降 69.9%，而在湿润年份拐点上升到 80～100 cm 土层，相比表层下降 28.8%。演替后期在干旱和湿润年份土壤含水量的拐点均为 40～60 cm 土层，相比表层前者下降 58.0%，后者下降 25.8%。成熟期在干旱和湿润年份土壤含水量的拐点均为 80～100 cm 土层，相比表层前者下降 71.5%，后者下降 26.8%。综上所述，在干旱年份，深层土壤含水量相比表层的下降程度显著大于湿润年份，表现出过分耗损的现象。

2.2.3 土壤含水量的影响因素

双因素方差分析可知(表 4)，在水平动态中，季节变化、植被演替对荒漠土壤含水量的影响均达到极显著水平($P<0.01$)，二者交互作用的影响达到显著水平($P<0.05$)，且植被演替对土壤含水量的影响大于季节变化。在垂直动态中，迎风坡坡位变化、土层深度对土壤含水量的影响均达到极显著水平($P<0.01$)，二者交互作用的影响达到显著水平($P<0.05$)，且土层深度对土壤含水量的影响大于坡位变化。表明土壤含水量对环境因子的变化十分敏感，时间动态、空间格局均可以显著改变荒漠土壤水分状况。

表 4　荒漠土壤含水量对环境因子的响应

Tab. 4　The response of desert soil water content to environment factors

指标	类别	差异源	*df*	均方	*F* 值	*P*
土壤含水量	水平动态	季节变化	5	0.931	5.125	0.006**
		演替阶段	3	2.643	14.548	<0.001**
		季节变化×演替阶段	15	0.182	1.743	0.026*
	垂直动态	坡位变化	2	1.267	7.035	0.008**
		土层深度	8	3.848	21.363	<0.001**
		坡位变化×土层深度	16	0.180	1.461	0.015*

注：*$P<0.05$，**$P<0.01$，*df* 表示自由度，*F* 值为统计量。

2.3 土壤储水量变化特征

如图 5 所示，降水量年际变化直接影响土壤对水分的蓄存，干旱年份(2017 年)土壤储水量显著低于湿润年份(2018 年)，前者仅为 89.8 mm，后者为 150.8 mm。不同演替阶段土壤储水量表现为：演替初期(129.8 mm)>成熟期(126.3 mm)>演替后期(120.7 mm)>演替中期(104.4 mm)。在干旱年份，自生长季初期至生长季末期，演替初期、中期和后期土壤储水量分别增加 13.10 mm、4.1 mm 和 11.7 mm，而成熟期却减少 2.5 mm；在湿润年份，4 种样地土壤储水量均为增加，平均增加 52.2 mm。表明降水量较少的年份，植被盖度和生物量最大的成熟期，植被在生长季对土壤贮水的消耗大于降水的补给，容易造成土壤水分亏缺。

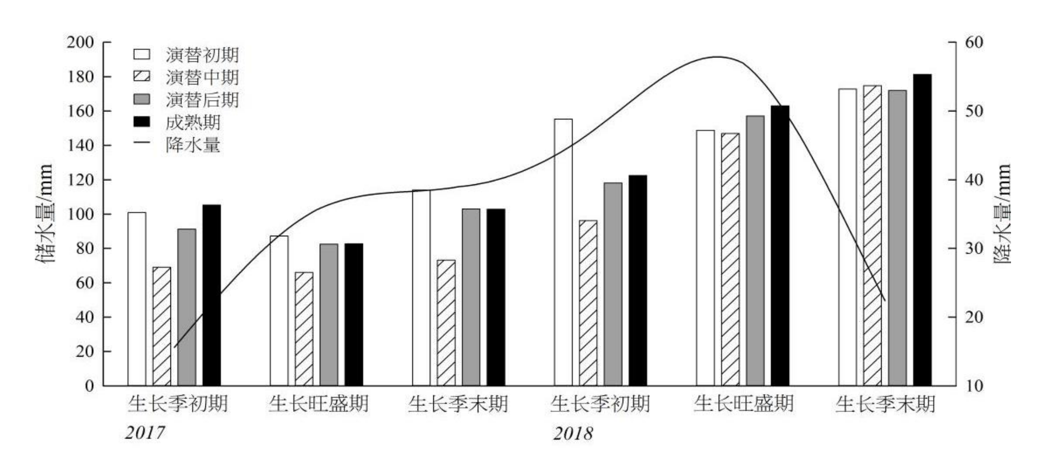


图 5　生长季 0～180 cm 土层荒漠土壤储水量变化

Fig.5　The variation of desert soil water storage at 0～180 cm soil layer in growing season

3　讨论

荒漠土壤含水量与降水、蒸发、土壤性质、植被类型、结构组成等密切相关，长期处于动态变化之中，具有明显的时空格局分异[16]。本研究表明，在植被演替进程中，土壤含水量整体上呈先降低后逐渐恢复的趋势，表现为：演替初期>成熟期>后期>中期，这与马全林等[17]的研究结果相似，在干旱区沙漠化逆转过程中，土壤水分含量以初始阶段流动沙丘最大，之后逐渐降低，到封育恢复 25 a 后又出现增长趋势。出现这种现象的主要原因为：(1)固沙植被建立之初为流动沙地，植被盖度低，生长耗水少，且土壤质地疏松，有利于降水入渗补给[18]，因此，演替初期土壤含水量相对较高。(2)随着固沙植被的生长发育，覆盖度和生物量的增加导致耗水量急剧上升，深层土壤水分在根系的汲取下逐渐干化[19]；植物冠层对降水的截留作用，减少了土壤获得的有效补给量，在单株水平上，油蒿和柠条的冠层截留损失分别占到降水量的 15%和 27%[20]，水分支出的增大和收入的减小，是演替中期土壤水分最低的主要原因。(3)从演替后期到成熟期，作为建群种的沙柳经过自然稀疏后密度降低，深根型的柠条逐渐退出，浅根型的油蒿逐渐增多，草本植物大量生长，生物结皮由藻类向地衣和苔藓发育，首先表现为冠层对降水的截留效应减弱，到达土壤的有效降水增多；其次是柠条灌丛的蒸散量较大，根层水分储量亏损严重，而油蒿灌丛在整个生长季却保持较低的蒸散水平[21]，因此当柠条逐渐退出群落后，深层土壤水分得以休养生息，而吸收浅层水分的油蒿也不会出现过度利用的现象；第三，在演替过程中，地表植被逐渐由单一人工建植树种向多种灌木、草本混生发展，而植物在单一种群时叶片蒸腾速率和水分利用率均高于其在与其他植物种混生时，如混生中的柠条叶片蒸腾速率相比单一柠条约减弱 20%，油蒿约减弱 40%，较低的蒸腾速率也降低了植物对土壤水分的汲取[22]；第四，生物结皮可以改变土壤表面蒸发，Liu 和 Zhang 等[23-24]发现，苔藓结皮在小降水事件(<7.5 mm)后抑制蒸发，在较大降水(>10 mm)后则利于蒸发。而本研究区中，75.3%的降水事件均为小降水，说明演替成熟期苔藓结皮的覆盖有效减弱了土壤水分的蒸发损失；第五，生物结皮对空气凝结水的吸附成为浅层土壤水分的重要来源，且其吸附水量随结皮发育演替逐渐增大[25]。综上所述，土壤水分的支出减小和收入增多，导致了自演替后期开始至成熟期，土壤含水量逐步恢复的现象。

然而，这种土壤含水量随植被演替的变化规律，却在很多学者的研究中出现了不同的结果。张军红等[26]表明，从固沙先锋物种阶段到建成阶段，土壤水分呈持续降低趋势；李冬梅等[27]表明，土壤含水量随演替进程呈先降低后增加再降低的变化；席军强等[28]研究发现，表层土壤水分随建植年代增加而增加，深层随植被恢复逐渐降低。这种不同结果的出现，可

能是由土壤性状的空间异质性造成的[29]。很多学者发现，气象、植被对区域土壤水分空间变异的解释是有限的；相反，局地土壤因子，如土壤机械组成、土壤滞留含水量、饱和含水量等水力参数，对土壤水分第一主要空间结构具有显著相关关系[30-31]。在本研究中，土壤容重随植被演替进程逐渐降低，而土壤孔隙度和饱和含水量则随演替呈增大趋势（表 1）。这种土壤水力和物理参数的改变，提高了沙质土壤的持水能力和保水性，这也是沙地固定后期，土壤含水量逐步恢复的主要原因之一。因此，植被演替和土壤性状的差异，导致了水文导度的空间变异，从而使得土壤—植被系统的生态水文过程和互馈机理发生变化，形成了土壤水分特征随植被演替的差异化表现。

本研究是利用空间代替时间法对植物演替阶段进行划分，这与大部分研究相同[17,26]。该方法运用的基础是要确保所选样地具有立地条件和气候要素的一致性，尽量避免基础背景差异所产生的不确定性。本研究中，4 个阶段的样地为同一区域，微地形、土壤、降水、温度等不会产生明显变化，空间代替时间法是合理适用的。总体来说，在荒漠区人工建植促进植被恢复后，植物的生长耗水在一定时期内会引起土壤水分下降甚至亏损，根际层对水分的大量利用会导致深层土壤无法获得有效水分补给，在水平和垂直空间内形成了新的水分格局。而以水分为基本生命要素的植物，在对水分格局变化的适应过程中，将逐渐改变其群落组成和生态位。可以明确，荒漠区土壤水分条件和承载力是植被分布格局和演替进程的决定因素，在消耗与补给的博弈中形成的水分平衡，则是荒漠区植被建设需要遵循的自然法则。

4 结论

人工建植促进植被演替，降水量年际和季节差异，地形和土层深度的变化，导致研究区荒漠土壤含水量具有十分明显的时空动态特征。在植被演替过程中，土壤含水量整体呈先降低后增大的趋势，表现为：演替初期>成熟期>演替后期>演替中期。研究区降水量年际差异较大，2017 年为干旱年份，2018 年为湿润年份，土壤含水量也呈现相应干湿变化，后者含水量为前者 1.84 倍。生长季内，土壤含水量的季节变化受到降水事件和植物生长的直接影响，具有 3 个明显变化过程，即生长季初期的缓慢下降阶段，生长旺盛期降水补给后的快速增长阶段和生长季末期的稳定积累阶段。在沙丘迎风坡的不同坡位中，坡中土壤含水量最低，坡顶和坡底含水量在不同演替阶段各有高低。荒漠土壤含水量具有随土层加深先降低后增大的动态趋势，存在明显的水分拐点。土壤储水量随降水和植被演替出现波动，除干旱年份成熟期生长季土壤水分出现少量亏损外，研究区内整体土壤水分的补给与消耗能够达到正向平衡，可以满足现有植物生长需水。

参考文献:

[1] Mccoll K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(2):100-104.

[2] Xia J, Ning L, Wang Q, et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change[J]. Climatic Change, 2017, 144(3):549-563.

[3] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review[J]. Earth Science Reviews, 2010, 99(3):125-161.

[4] 刘雪佳, 董璐, 赵杰, 等. 我国荒漠植被生产力动态及其与水热因子的关系[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 459-466.[Liu Xuejia, Dong Lu, Zhao Jie, et al. Dynamic state of desert vegetation productivity and its relationship with water-heat factors in China[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 459-466.]

[5] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, Northern China[J]. Restoration Ecoogyl, 2004, 12:376-290.

[6] Das N N, Mohanty B P. Root zone soil moisture assessment using remote sensing and vadose zone modeling[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(1):296-307.

[7] 李新荣，张志山，王新平，等. 干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. 中国沙漠，2009，29(5):845-852.[Li Xinrong, Zhang Zhishan, Wang Xinping, et al. The ecohydrology of the soil vegetation system restoration in arid zones :a review[J].Journal of Desert Research, 2009, 29(5):845-852 .]

[8] Yang L, Chen L, Wei W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions[J]. Catena, 2015, 124: 138-146.

[9] 朱海，胡顺军，陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J]. 土壤学报，2016，53(1):117-126.[Zhu Hai, Hu Shunjun, Chen Yongbao. Spatio-temporal variation of soil moisture in fixed dunes at the southern edge of Gurbantunggut Desert[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1):117-126.]

[10] 李少华，张立恒，王学全，等. 高寒灌木固沙区土壤性状与植被生长特征的相关分析[J]. 干旱区研究，2017，34(6):1331-1337.[Li Shaohua, Zhang Liheng, Wang Xuequan, et al. Soil properties and shrub growth in an alpine sandy area[J]. Arid Zone Research,2017, 34(6):1331-1337.]

[11] 王艳莉，刘立超，高艳红，等. 人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J]. 中国沙漠，2015，35(4):942-950.[Wang Yanli, Liu Lichao, Gao Yanhong, et al. Dynamicand spatial distribution of soil moisture in an artificially re-vegetated desert area[J].Journal of Desert Research, 2015, 35(4):942-950.]

[12] 常昌明，牛建明，王海，等. 小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区研究，2016，33(2): 260-265.[Chang Changming, Niu Jianming, Wang Hai, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall in a *Stipa klemenzii* steppe[J]. Arid Zone Research,2016, 33(2): 260-265.]

[13] 伍永秋，张健枫，杜世松，等. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠，2015，35(6):1612-1619.[Wu Yongqiu, Zhang Jianfeng, Du Shisong, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in dunes with different vegetation coverage in southern margin of the Mu Us sandy land[J].Journal of Desert Research, 2015, 35(6):1612-1619.]

[14] 顾梦鹤，谢泽慧，王春晖，等. 库布其沙漠 8 种防护林的土壤水分特征[J]. 草业科学, 2017, 34(12):2437-2444.[Gu Menghe, Xie Zehui, Wang Chunhui, et al. Soil moisture characteristics of eight types of shelter forest in the Kubuqi desert[J].Prataculturral Science, 2017, 34(12):2437-2444.]

[15] 付聪明，王茜. 库布齐沙漠防风固沙植被生态系统土壤水分状况分析与评价[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2009，30(4):119-125.[Fu Congming, Wang Qia. Kubuqi desert wind sand soil of vegetation analysis and evaluation of water status[J].Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2009, 30(4):119-125.]

[16] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57:1-16.

[17] 马全林，鱼泳，陈芳，等. 干旱区沙漠化逆转过程土壤水分的空间异质性特征[J]. 干旱区地理，2010，33(5):716-724.[Ma Quanlin, Yu Yong, Chen Fang, et al. Spatialheterogeneity of soil water content in the reversion process of desertification in arid area[J].Arid Land Geograghy, 2010, 33(5):716-724.]

[18] Gerile G. A study on moisture balance of artificial *Haloxylon ammodendron* forest in Kubuqi desert[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31(3):125-129.

[19] 张定海，李新荣，陈永乐. 腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究[J]. 生态学报，2016，36(11):3273-3279.[Zhang Dinghai, Li Xinrong, Chen Yongle. Simulation study on the effects of sand binding shrub on the deep soil water in a recovered area on the southeast fringe of Tengger Desert, North China[J].Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11):3273-3279.]

[20] Zhang Z S, Li X R, Liu L C, et al. Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, Northwestern China[J]. Journal of Plant Research, 2009, 122: 109-119.

[21] 李新荣，张志山，黄磊，等. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J]. 科学通报，2013，58(5-6):397-410.[Li Xinrong, Zhang Zhishan, Huang Lei, et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(5-6):397-410.]

[22] 张志山，李新荣，王新平，等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾测定[J]. 生态学报, 2005, 25: 2484-2490.[Zhang Zhishan, Li Xinrong, Wang Xinping, et al. Evaporation and transpiration in re-vegetated desert area[J].Acta Ecologica Sinica, 2005, 25: 2484-2490.]

[23] Liu L C, Li S Z, Duan Z H, et al. Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou,

Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328: 331-337.

[24] Zhang Z S, Liu L C, Li X R, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 964-973.

[25] 李新荣，贾玉奎，龙利群，等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠，2001，20(1): 4-11.[Li Xinrong, Jia Yukui, Long Liqun, et al. Advances in Microbiotic Soil Crust Research and Its Ecological Significance in Arid and Semiarid Regions[J].Journal of Desert Research, 2001, 20(1): 4-11.]

[26] 张军红，吴波，杨文斌，等. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析[J]. 中国沙漠，2012，32(6):1597-1603.[Zhang Junhong, Wu Bo, Yang Wenbing, et al. Soil moisture characteristics of *Artemisia Ordosica* community at different succession stages in Mu Us sandy land[J].Journal of Desert Research, 2012, 32(6):1597-1603.]

[27] 李冬梅，焦峰，雷波，等. 黄土丘陵区不同草本群落生物量与土壤水分的特征分析[J]. 中国水土保持科学，2014, 12(1):33-37.[Li Dongmei, Jiao Feng, Lei Bo, et al. Aboveground biomass production and soil moisture characteristics of different herb communities in the Loess Hilly-gully Region[J].Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(1):33-37.]

[28] 席军强，赵翠莲，杨自辉，等. 荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤水分空间分布及入渗特征[J]. 草业学报，2016, 25(11) :15-24.[Xi Junqiang, Zhao Cuilian, Yang Zihui, et al. Soil mositure spatital distribution and infiltration characteristics of *Nitraria* nebkha in an oasis-desert ecoton[J].Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(1):33-37.]

[29] 潘颜霞，王新平，苏延桂，等. 荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J]. 生态学报，2009，29(2):993-1000.[Pan Yanxia, Wang Xinping, Su Yangui, et al. Temporal and spatial variability of surface soil moisture in a revegetation desert area in Shapotou[J].Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2):993-1000.]

[30] Wang T, Franz T E, Li R, et al. Evaluating climate and soil effects on regional soil moisture spatial variability using EOFs[J]. Water Resources Research, 2017b, 53(5): 4022-4035.

[31] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2012, 57(2): 265-281.